

Approved For Release STAT
2009/08/19 :
CIA-RDP88-00904R000100120

Dec

Approved For Release
2009/08/19 :
CIA-RDP88-00904R000100120



Вторая Международная конференция
Организации Объединенных Наций
по применению атомной энергии
в мирных целях

27/28
A/CONF/15/P/2053
USSR
ORIGINAL: RUSSIAN

Не подлежит оглашению до официального сообщения из Конференции

*Attached English translation to table 105
7 hours meeting English paper (draft 105)*

ПРУТКОВЫЙ ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩИЙ ЭЛЕМЕНТ ДЛЯ ТЯЖЕЛО-
ВОДНОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО РЕАКТОРА С ГА-
ЗОВЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ.

Христенко П.И., Петров П.А., Митрополевский В.А.,
Синельников К.Д., Иванов В.Е., Зеленский В.Ф.

1. Конструкция тепловыделяющего элемента

Идея создания тяжеловодного реактора с газовым охлаждением ¹ зародилась из желания уменьшить количество дорогостоящей тяжелой воды, применив ее только в качестве замедлителя, и получить при этом реактор работающий на природном уране с большим выгоранием $U-235$ и получающегося в нем плутония, что очень важно с экономической точки зрения.

Реактор такого типа изображен на рис. 1. Конструкция тепловыделяющих элементов реактора тесно связана с кон-

25 YEAR RE-REVIEW

- 2 -

струкцией самого реактора. Реактор имеет стальной корпус (1) рассчитанный на давление 65 ата. В нем помещен алюминиевый бак (2) с тяжелой водой в качестве замедлителя. Тяжеловодный бак пронизывают алюминиевые трубы (3) (технологические каналы), в которые помещаются тепловыделяющие элементы (4). Над тяжеловодным баком помещается зона расхолаживания (5), в которой выдерживаются отработавшие или поврежденные элементы после извлечения их из активной зоны до выгрузки их из реактора. Тепловыделяющие элементы (4) соединены подвижной штангой (6) с защитной пробкой (7). Таким образом извлечение тепловыделяющих элементов из реактора производится вместе с пробкой и штангой.

Такая конструкция реактора дает возможность работать как на режиме с периодической разгрузкой реактора, так и на непрерывном режиме. В первом случае зона расхолаживания служит для хранения поврежденных тепловыделяющих элементов (реактор рассчитывается на возможность работы без 6-8 тепловыделяющих элементов), которые без остановки работы реактора при помощи штанги (поз.6) переводятся из активной зоны в зону расхолаживания. Во втором случае зона расхолаживания служит, как для хранения поврежденных тепловыделяющих элементов, так и для расхолаживания тепловыделяющих элементов перед их выгрузкой из реактора. При непрерывной работе реактора подъем тепловыделяющих элементов из активной зоны в зону расхолаживания также производится при помощи подвижной штанги (6), выгрузка же их производится при помощи специальной машины, работающей при выгрузке и загрузке под давлением реактора. Машина за одну операцию должна вынуть отработавший элемент с пробкой и заменить его на новый.

Циркуляция охлаждающего газа (углекислоты) в реакторе

- 3 -

происходит сверху вниз. Регулирование расхода охлаждающего газа через технологический канал производится при помощи золотника (8), привод которого (9) находится в пробке тепловыделяющего элемента (7). Измерение температуры охлаждающего газа за каналами реактора и его активности производится при помощи термометров, вставляемых через днище стального корпуса к выходу каждого технологического канала, и путем отсоса охлаждающего газа из каждого канала на специальные регистрирующие устройства.

Конструкция тепловыделяющего элемента изображена на рис.2. Он представляет собой пучок тонких прутков (1) из природного урана. Диаметр прутка (без покрытия) 4 мм, длина 4,0 м.

Прутки имеют защитное покрытие из магний-бериллиевого "сплава" толщиной 0,45 мм.

Пучок прутков помещен в экранную трубу (2) из магниевых сплавов.

Возможность устройства высокотемпературного тяжеловодного реактора с газовым охлаждением данной конструкции обеспечивается наличием узкой щели между экраном тепловыделяющего элемента (1) и алюминиевой трубой (3) технологического канала, отделяющей тяжелую воду от газа. Охлаждающий газ направляется сверху вниз и при поступлении в тепловыделяющий элемент разделяется на два потока: большой, идущий на охлаждение прутков, и малый, идущий на охлаждение экрана. Алюминиевая труба технологического канала с одной стороны охлаждается тяжелой водой, а с другой стороны ее предохраняет от высоких температур поток сравнительно холодного газа, движущегося по щели между технологической трубой и экраном тепловыделяющего элемента.

Пройдя активную зону реактора, газ, движущийся по

2983-102

- 4 -

экранной щели, смешивается с общим потоком.

Прутки свободно подвешиваются в верхней части тепло-выделяющего элемента на подвеске (4), выполненной в виде многоярусной горки, что сделано для облегчения входа газа в тепловыделяющий элемент.

Для дистанционирования прутков применялись либо решетки из циркония (5), также выполненные в виде многоярусных горок, расположенные на расстоянии 0,8-1,0 м друг от друга, либо спиральная обмотка рядов прутков дистанционирующей проволокой (6); дистанционирующая проволока выполняется из магниевых сплавов.

Такая конструкция тепловыделяющего элемента дает возможность пруткам свободно расширяться вниз при термических и радиационных удлинениях.

Выбор в качестве тепловыделяющих элементов тонких прутков был сделан исходя из того, что такая система, имея большую тепловыделяющую поверхность, в то же время, имея практически одно измерение (длину), мало подвержена короблению из-за неоднородности структуры урана и изменения нейтронного поля по поперечному сечению тепловыделяющего элемента и связанных с этим неодинаковых радиационных и термических деформациях. В вертикальном положении прутки тепловыделяющего элемента удерживаются силой собственного веса и совпадающей с ней по направлению силой, возникающей благодаря трению охлаждающего газа о прутки, при его движении сверху вниз.

Для увеличения мощности реактора с газовым охлаждением к нему целесообразно, наряду с "физическим выравниванием" при помощи перераспределения урана по реактору, применять и "тепловое выравнивание", т.е. проходное сечение для охлаждающего газа в тепловыделяющих элементах выбирать в соот -

- 5 -

вместии с кривой выделения энергии по радиусу реактора. При этом в центральной зоне реактора должны быть установлены тепловыделяющие элементы с большим проходным сечением для охлаждающего газа, а в периферийной с меньшим. Это ведет к увеличению мощности центрального канала, а следовательно и всего реактора. В то же время температура охлаждающего газа за каналами центральной зоны снижается, а это дает возможность держать экран тепловыделяющих элементов центральной зоны при температуре не превышающей 300°C . Температура газа за каналами периферийной зоны при "тепловом выравнивании" повышается и для снижения температуры экрана его необходимо защищать графитовыми втулками, как показано на рис.2 (поз.7).

Тепловыделяющий элемент состоит из 150-200 прутков.

Прутки расположены по круговой симметрии на равных по радиусу расстояниях друг от друга и на различных расстояниях вдоль окружностей.

На рис.3 графически изображена кривая изменения относительной плотности потока $\left(\frac{q}{q_0}\right)$ нейтронов по радиусу (R) тепловыделяющего элемента. Указанное на рис.3 распределение плотности нейтронов по радиусу тепловыделяющего элемента приводит к тому, что в прутках, расположенных на его периферии, выделяется больше тепла, расположенных в центре меньше. Отношение тепловыделений периферийного и центрального прутков может достигать двух.

Опыты показали, что при данной конструкции тепловыделяющего элемента нельзя ожидать в нем сколько-либо значительного перемешивания охлаждающего газа. Для тепловыделяющего элемента с равномерным распределением прутков и неравномерным выделением тепла по его поперечному сечению отсут-

- 6 -

ствие перемешивания ведет к значительному (до 25-30%) уменьшению мощности по сравнению с той, которую от него можно было бы отвести, если бы не было неравномерности тепловыделения.

С целью увеличения отвода мощности от тепловыделяющего элемента было применено "тепловое выравнивание" (профилирование), т.е. перераспределение прутков по его поперечному сечению с таким расчетом, чтобы более нагруженные элементы омывал более мощный поток охлаждающего газа, для чего на периферии прутки расставлялись редко, в центре часто. Тепловыделяющие элементы описанного типа рассчитаны на работу при температурах поверхностей до 500°C.

П. Изготовление тепловыделяющего элемента

Урановая проволока для тепловыделяющего элемента получалась несколькими способами: ковкой на ротационно-ковочной машине; прокаткой в вакууме на специально сконструированном и построенном для этой цели вакуумном стане и методом прессования заготовок в медных чехлах с последующей протяжкой их до нужного размера через очко.

Нанесение покрытий на урановые сердечники состоит из следующих операций:

1. Контроль урановой проволоки.
2. Травление в растворе азотной кислоты.
3. Обезгаживание и закалка проволоки.
4. Приварка наконечников из нержавеющей стали.
5. Нанесение магниево-бериллиевого покрытия дистилляционным методом.
6. Контроль герметичности покрытия.
7. Упаковка в контейнер.

- 7 -

Урановые сердечники поступают для нанесения покрытия в виде проволоки диаметром 4 мм и длиной 4 м. Контролируются размеры и поверхность проволоки, которая должна быть достаточно гладкой.

Для удаления посторонних металлических примесей и следов окислов с поверхности урановой проволоки она подвергается травлению в растворе азотной кислоты.

Чтобы предотвратить изменения геометрических размеров прутковых элементов при нейтронном облучении производится разрушение текстуры исходного урана закалкой из высокотемпературных фаз бета или гамма. Были изучены различные способы заковки урановой проволоки. Наиболее пригодной для данного случая является закалка в высоком вакууме.

Внешний вид установки для заковки представлен на рис. 4. Установка позволяет осуществлять непрерывный процесс обезгаживания и заковки проволоки.

Для защиты от окисления в рабочих условиях и предотвращения выхода осколков деления во внешнюю среду на проволоку наносится дистилляционным методом покрытие из магний-бериллиевого сплава. Процесс нанесения покрытия ведется в высоком вакууме. Магний-бериллиевый сплав конденсируется на поверхности проволоки в виде тонких чередующихся слоев. Для обеспечения надежного сцепления покрытия с урановым сердечником последний перед покрытием подвергается в вакууме кратковременному отжигу и зачистке.

Внешний вид установки представлен на рис. 5 и ее схема - на рис. 6.

В качестве контроля герметичности покрытия применяется испытание покрытых элементов в атмосфере кислорода при давлении 40 атм и температуре 550°C в течение 10 часов. Испытания производятся в автоклаве (рис. 7).

2983-102

- 8 -

Готовые элементы могут длительно храниться в сухих помещениях. Упаковка элементов производится в деревянные ящики. Элементы укладываются слоями и слои друг от друга отделяются гофрированной бумагой.

III. Испытания тепловыделяющего элемента вне реактора.

Испытания тепловыделяющих элементов проводились в течение ряда лет ^{x/}.

Для проведения этих работ был создан ряд стендов. На рис.8 дана фотография одного из стендов для продувки тепловыделяющего элемента.

Были исследованы коробление прутков при нагревании, вибрации прутков в тепловыделяющем элементе при продувке, коррозионные испытания прутков при тепловой нагрузке, создаваемой при помощи электрического нагрева в потоке охлаждающего газа, теплоотдача и аэродинамика тепловыделяющего элемента.

1. Для устранения коробления прутки предварительно отжигались под растягивающей нагрузкой в вертикальном положении при температуре 500-550° в течение нескольких часов.

2. Вибрации прутков в тепловыделяющем элементе исследовались с помощью емкостного метода.

В качестве конденсатора использовались сами прутки. Любая пара электрически изолированных прутков образует меж-

^{x/} Работы проводили А.М.Антуфьев, Г.С.Белецкий, П.М.Волков, П.И.Пучков, Ю.Д.Редько, А.И.Гривнин, М.И.Изуцхивер.

- 9 -

ду собой конденсатор, емкость которого определяется геометрией прутков, расстоянием между ними и диэлектрической постоянной среды. Если один из прутков или оба начнут колебаться, то расстояние между ними будет изменяться и, следовательно, будет изменяться емкость. Таким образом сами прутки тепловыделяющего элемента представляют собой емкостный датчик.

Измерение колебаний прутков в пучке (тепловыделяющем элементе) производилось поочередным подключением любой пары прутков на вход прибора. Для определения амплитуды и частоты колебания одиночного прутка соседний прутки, образующий с ним конденсатор, жестко закреплялся при помощи нитяга.

3. Испытания по теплопередаче и аэродинамике тепловыделяющего элемента проводились на специальных стендах с пучками из 19 прутков диаметром 8 мм в каналах диаметром 60, 68 и 82 мм.

Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы:

а/ Теплоотдача продольно омываемых пучков прутков, при обработке экспериментальных данных по средней температуре потока и гидравлическому эквивалентному диаметру, не зависит от расстояния между прутками.

В области $Re = 3 \cdot 10^3 \div 5 \cdot 10^5$ теплообмен подчиняется зависимости

$$Nu = 0,021 Re^{0,8} Pr^{0,43}$$

б/ На коэффициент гидравлического сопротивления канала взаимное расположение прутков в пучке не влияет х/.

х/ Предполагается, конечно, что в этом случае прутки расположены равномерно по каналу.

2983-102

- 10 -

В области значений $Re \leq 10^5$ коэффициент сопротивления пучков прутков должен подсчитываться по формуле Елазюса.

$$\xi = 0,3164 Re^{-0,25}.$$

Определяющим геометрическим размером следует принимать гидравлический эквивалентный диаметр пучка, а определяющей температурой - среднюю температуру потока.

В области $Re = 10^5 + 5 \cdot 10^5$, - следует пользоваться формулой Никурадзе, с введением постоянного множителя 1,12, т.е.

$$\xi = 1,12 \left(0,0032 + \frac{0,221}{Re^{0,237}} \right)$$

4. До постановки прутковых тепловыделяющих элементов на испытания в реактор была проведена серия испытаний их под тепловой нагрузкой, создаваемой электрическим током, с целью определения их коррозионной стойкости при разных температурах в разных средах.

Испытанию подвергались прутки и пакеты прутков. Диаметр испытываемых прутков из урана был 4 мм, толщина покрытия из магний-бериллиевого "сплава" колебалась от 0,27 до 0,54 мм, а содержание бериллия в покрытии от 0,01 до 2% (по весу).

Прутки испытывались как в свободном потоке воздуха и углекислоты при тепловой нагрузке от 0,2 до 0,5 кВт на погонный метр прутка, так и в вынужденном потоке углекислоты и гелия при тепловых нагрузках от 2 до 5 кВт на погонный метр прутка.

Продолжительность испытаний колебалась от 1000 до 10000 часов. Результаты испытаний показали, что магний-бер-

- 11 -

ридиевое покрытие обеспечивает надежную защиту тепловыделяющих элементов от окисления на воздухе при температурах 500-625°C. При доведении температуры до 700-710°C появляются вздутия и трещинки, что отчетливо видно на рис.9 и 10.

Пруток с содержанием бериллия в покрытии более 2%, прошедший предварительные испытания в свободном потоке воздуха в течение 1029 часов при температуре 520°C, был нагрет в свободном потоке углекислоты до 750°C. Через 25 минут в четырех местах образовались кольцевые складки (см.рис.11). Температура была доведена до 825°C. Через 5 минут прутки сильно покоробило. При этих температурах оплавления и горения магния не наблюдалось. При попытке выправить прутки увеличением растягивающего груза, он разорвался и опыт был прекращен. Продольные разрезы по складкам вызванным размягчением (рис.12) показали, что металл покрытия в этих местах плотно пристает к урану и что никаких признаков окисления урана нет.

Эти опыты показали, что даже при температурах 700-800°C покрытие с содержанием бериллия более 2% не загорается в углекислоте и существенно не оплавляется в течение нескольких часов.

После проведения коррозионных испытаний толщина покрытия была принята равной 0,45 мм, а его рабочая температура 500°C.

IV. Радиационные испытания тепловыделяющих элементов

Радиационные испытания моделей тепловыделяющих элементов выполнялись в экспериментальной газовой петле реактора ФТР, схема которой представлена на рис.13. Петля состоит

- 12 -

из рабочего канала, помещенного в отражатель реактора, электроподогревателя, рекуператора и холодильника для поддержания температурного режима газа, керамического фильтра для улавливания пыли, и поршневого компрессора, обеспечивающего циркуляцию газа. Давление газа в контуре доводилось до 60 ата. Наблюдение за режимом работы петли производилось с центрального пульта, где сосредоточены все органы управления ^{х/}. Измерение температур газа осуществлялось термопарами. Температура покрытия определялась расчетом.

Активность газа в контуре петли измерялась ионизационными камерами, расположенными в различных местах системы трубопроводов. Проводился сбор проб газа из контура для измерения бета-активности, с целью контроля осколков деления проникающих в газ сквозь повреждения оболочки тепловыделяющих элементов.

Основной целью испытаний являлась проверка радиационной стойкости урановых прутков, изготовленных по различным технологическим схемам, а также механической и коррозионной стойкости покрытия в условиях облучения.

Ограничения, связанные с мощностью петли и высотой активной зоны реактора ($H=1$ м) не позволили испытывать тепловыделяющие элементы проектируемого реактора в натуральную величину. Испытывались модели, собранные из прутков, изображенных на рис.14. Модели отличались от натуральных - длиной урановых стержней, их количеством и размещением.

Стержни прутков изготавливались, как из природного урана, так и из урана с 2% обогащением. Обогащенный уран использовался для сокращения сроков экспериментов и получения боль-

^{х/} Эксплуатация петли выполнялась под руководством инженера Рязанцева Е.П.

- 13 -

ших тепловых нагрузок. В качестве теплоносителя использовалась углекислота при разных давлениях и весовых расходах.

Было испытано большое количество прутков с различной технологией нанесения покрытия и различным режимом обработки урановых стержней.

Механические испытания облученных образцов до выгорания 240 г/т и температуре около 500°C показали некоторое увеличение хрупкости, выражающееся в отсутствии остаточного удлинения после испытания на растяжение, в уменьшении работы разрушения при ударном изгибе и в отсутствии заметного остаточного угла изгиба при статическом изгибе. Стрела прогиба при статическом изгибе облученных образцов не превышает 1,5 мм, в то время как у необлученных образцов это увеличение составляет $4,5 \div 5,8$ мм. Испытание на растяжение выявило падение прочности, значение которой колеблется от 15 до 67 кг/мм², причем максимальное понижение прочности наблюдается у наименее удлинившихся образцов.

Было установлено, что большему радиационному росту соответствует более сильно выраженная текстура с преимущественным направлением $[010]$ по оси прутков.

Наличие текстуры в испытывавшихся образцах определялось измерением коэффициентов линейного термического расширения урана после облучения в осевом и радиальном направлениях, а также подробным рентгенотекстурным изучением на специально созданной установке (3). Так, например, в интервале температур 50°-400° для образца удлинившегося при облучении на 23% коэффициенты линейного термического расширения $\parallel \bar{\alpha} = 9,1 \cdot 10^{-6}$ и $\perp \bar{\alpha} = 18,8 \cdot 10^{-6}$, а для образца не удлинившегося эти коэффициенты примерно совпадают и равны $\bar{\alpha} = 16,5 \cdot 10^{-6}$.

2983-102

- 14 -

Обнаружено увеличение микротвердости $\chi/$. Наибольшее увеличение (в 1,65 раза) произошло у неудлинившихся образцов. Состояние торцевой сварки после облучения хорошее, наблюдалось снижение прочности на разрыв примерно на 25%.

Было проведено испытание заведомо текстурованных прутков из обогащенного до 2% урана при больших тепловых нагрузках, приближающихся к проектным. Эти испытания были предназначены для выявления механических свойств магний-бериллиевого покрытия, его стойкости при сложных деформациях прутков, для определения прочности сцепления покрытия с ураном, его плотности и способности выдерживать местные перегревы при соприкосновении соседних прутков в условиях облучения в реакторе.

Режим испытания: давление 25 ата, скорость газа 9 м/сек, средняя температура поверхности $440 \pm 50^\circ \text{C}$. Температура газа 200°C . Теплонапряжение поверхности $250000 \text{ ккал/м}^2 \text{ час}$. Время испытания 1251 час. Выгорание урана-235 составило 1070 г/т. Содержание бериллия в оболочке прутков № 4 и № 6 до 2% и в прутке № 8 - 4%. На рис.15 приведена фотография прутков после испытания в реакторе. Для удобства измерений каждый пруток разделен на две части пронумерованных соответственно 4-1 и 4-2; 6-1 и 6-2; 8-1 и 8-2. Остальные цифры рисунка обозначают номера образцов вырезавшихся для металлографических, рентгенографических и механических исследований.

Как видно из рис.15 прутки значительно изменили свою форму и размеры. Они сильно покоробились, удлинились от 15 до 180% и соответственно уменьшились в диаметре. Изменение формы каждого прутка различно, однако общее для всех прут-

х/ Металлографические исследования, механические и dilatометрические измерения выполнены И.Ф.Правдюком, Н.К.Проплетиным и др. 151.

2983-102

- 15 -

ков змееобразное коробление обусловлено продольным изгибом, вызванным невозможностью удлинения из-за отсутствия места в канале, а так же в силу неоднородности самого металла по сечению. Исследование оболочки показало, что она вела себя как пластичный чехол, который растягивался и изменял размеры и форму вместе с ураном. Отставания оболочки от уранового прутка обнаружено не было. Рентгенографические исследования этих образцов описаны в работе (4).

Механические испытания урана были выполнены для случая 15% удлинения. Испытания на статический изгиб показывают снижение прочности на 40% и уменьшение стрелы прогиба в $5 \div 10$ раз по сравнению с необлученным ураном. Отжиг при 550° в течение 3-х часов не приводит к заметным изменениям временного сопротивления изгибу, а также к изменению значения стрелы прогиба. Это вероятно связано с наличием микротрещин по объему металла, что подтверждается также рентгенографическими измерениями (4) напряжений второго рода по уширению дифракционных линий (131) для серии образцов описанных выше и линии (114) для образцов этой серии с удлинением 15 и 180%.

Микроструктура урана удлинившегося на 15%, см.рис.16, имеет следы значительной внутренней деформации (большое количество двойников изогнутой формы). Размер зерен до 100 микрон. Микроструктура урана удлинившегося на 180% (рис.17/ не имеет следов внутренней деформации (двойники отсутствуют). Размер зерен $5 \div 10$ микрон.

На рис.18 приведен общий вид прутков, прошедших испытания в аппарате в режиме приближающемся к проектному. Сердечники из урана 2% обогащения перед герметизацией были быстро охлаждены в воде ("закалены") из бета-фазы (740°C).

2983-102

- 16 -

После термообработки средний коэффициент термического расширения этих стержней определен в интервале 20-90° был равен $14,3 \cdot 10^{-6}$. Этот коэффициент соответствует большой степени изотропности урана. Характеристики потока охлаждающего газа аналогичны предыдущему эксперименту. Температура поверхности прутков 480°C. Содержание бериллия в оболочке $1 \pm 1,5\%$. Время испытания 3000 часов. Тепловая нагрузка $0,22 \cdot 10^6 \frac{\text{ккал}}{\text{м}^2 \text{ час}}$. Выгорание 2800 г/т. Радиационный рост - $1 \pm 2\%$.

Испытание на разрыв сварного шва между урановым сердечником и наконечником из нержавеющей стали показало, что разрушающее напряжение для шва равно $22,4 \text{ кг/мм}^2$ и сравнимо с напряжением разрушения для сердечника равного при тех же условиях $23,8 \text{ кг/мм}^2$. Металлографические исследования также подтверждают удовлетворительное качество сварного шва работавшего при указанных условиях.

Приведенные данные позволяют считать, что задача создания пруткового тепловыделяющего элемента для тяжеловодного реактора с газовым охлаждением успешно решается.

- 17 -

Л и т е р а т у р а

- 2983-102
1. Алиханов А.И., Владимирский В.В., Петров П.А., Христенко П.И. "Тяжеловодный энергетический реактор с газовым охлаждением". "Атомная энергия" (№ 1) 5-9 (1956).
 2. Кружилин Г.Н. "Реактор для физических и технических исследований". Доклад Р-620 на 1-й Международной конференции по мирному использованию атомной энергии.
 3. Батенин И.В. и Шаров Б.В. "Рентгеновская установка для структурного исследования радиоактивных материалов". "Приборы и техника эксперимента" (№ 3) 59-63 (1956).
 4. Батенин И.В. и Шаров Б.В. "Рентгенографическое изучение урана в связи с явлением роста при облучении". "Атомная энергия" т.Ш (№ 9) 261 (1957).
 5. Правдюк Н.Ф. "Металловедческая "горячая" лаборатория". Доклад Р/673 на 1-й Международной конференции по мирному использованию атомной энергии.

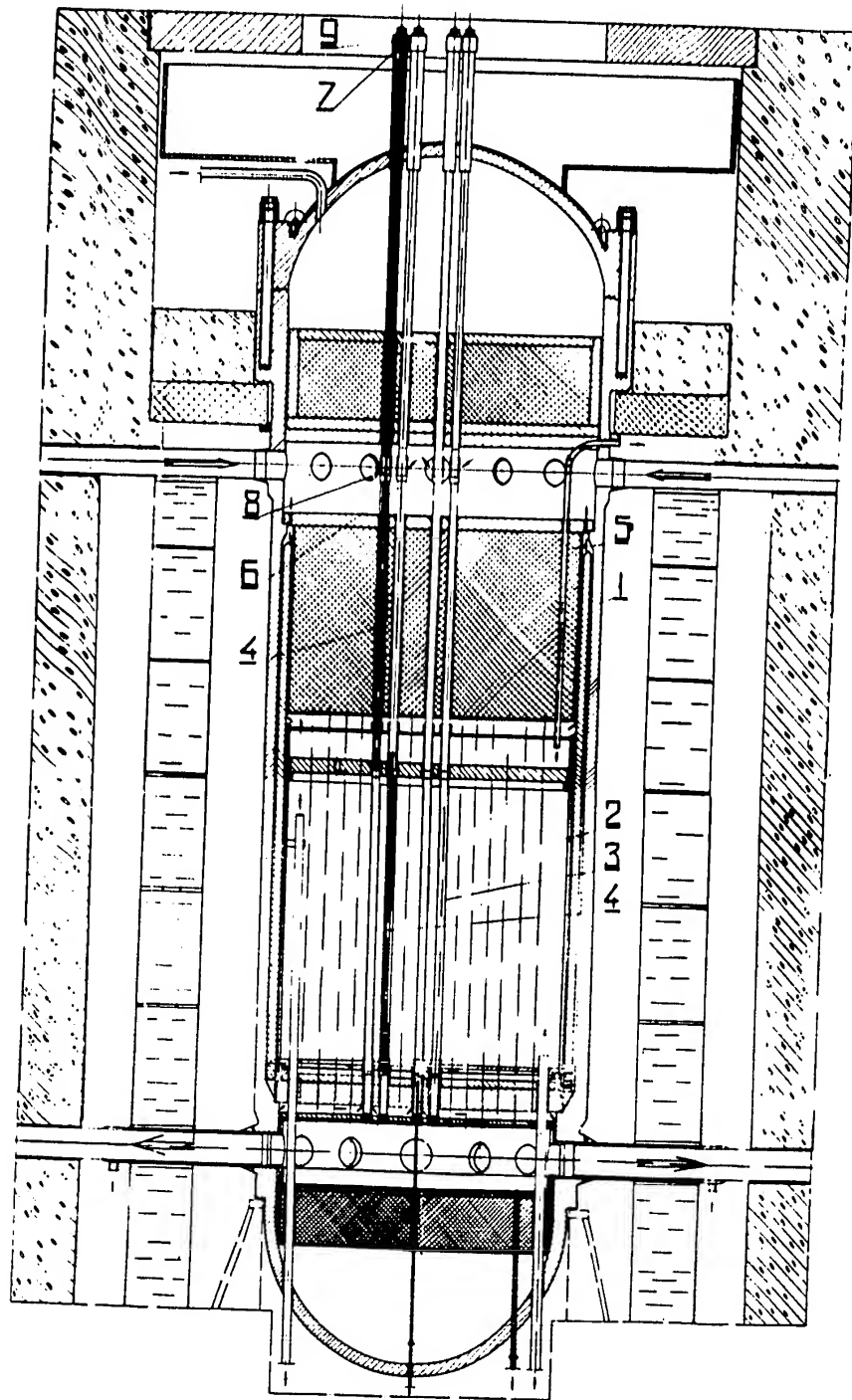


Рис. I. Тяжеловодный реактор с газовым охлаждением. /1/- стальной корпус, /2/- алюминиевый бак с тяжелой войлой, /3/- технологические каналы, /4/- тепловыделяющие элементы, /5/- зона расхолаживания, /6/- подвижная штанга тепловыделяющего элемента, /7/- защитная пробка, /8/- золотник для регулирования газа, /9/- привод золотника.

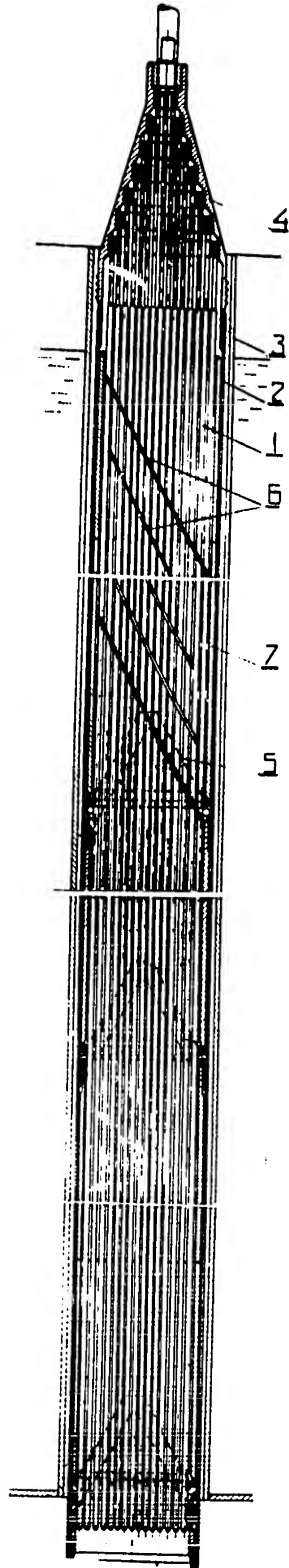
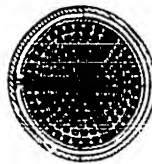


Рис. 2. /1/ - прутки из природного урана, /2/-
экранная труба, /3/ - алюминиевая труба
/4/ - подвеска для прутков /5/ - направля-
ющие решетки, /6/ - дистанциониру-
ющие обмотки, /7/ - графитовые втулки.



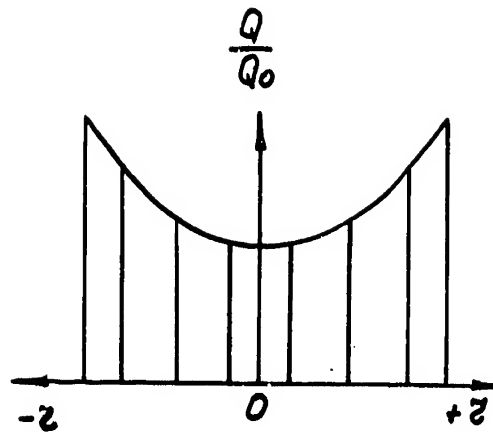


Рис.3. Кривая изменения плотности нейтронов по радиусу тепловыделяющего элемента.

2983-102

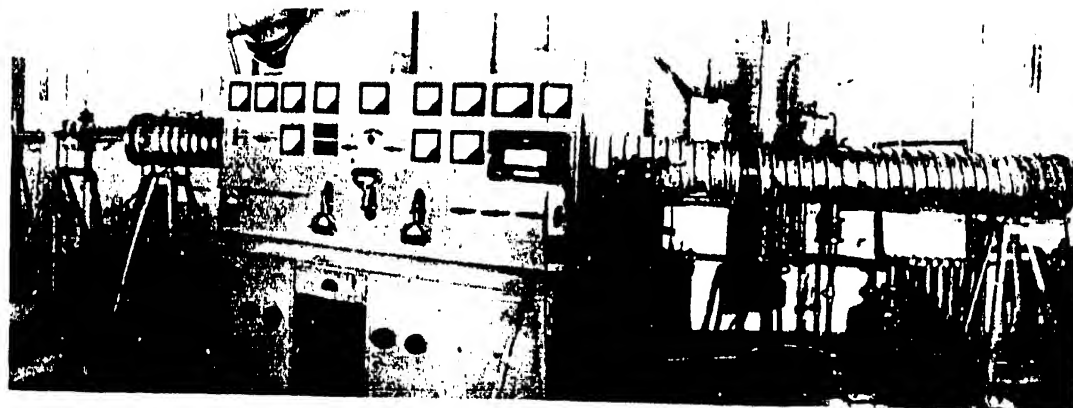


Рис. 4. Установка для закалки урановой проволоки.

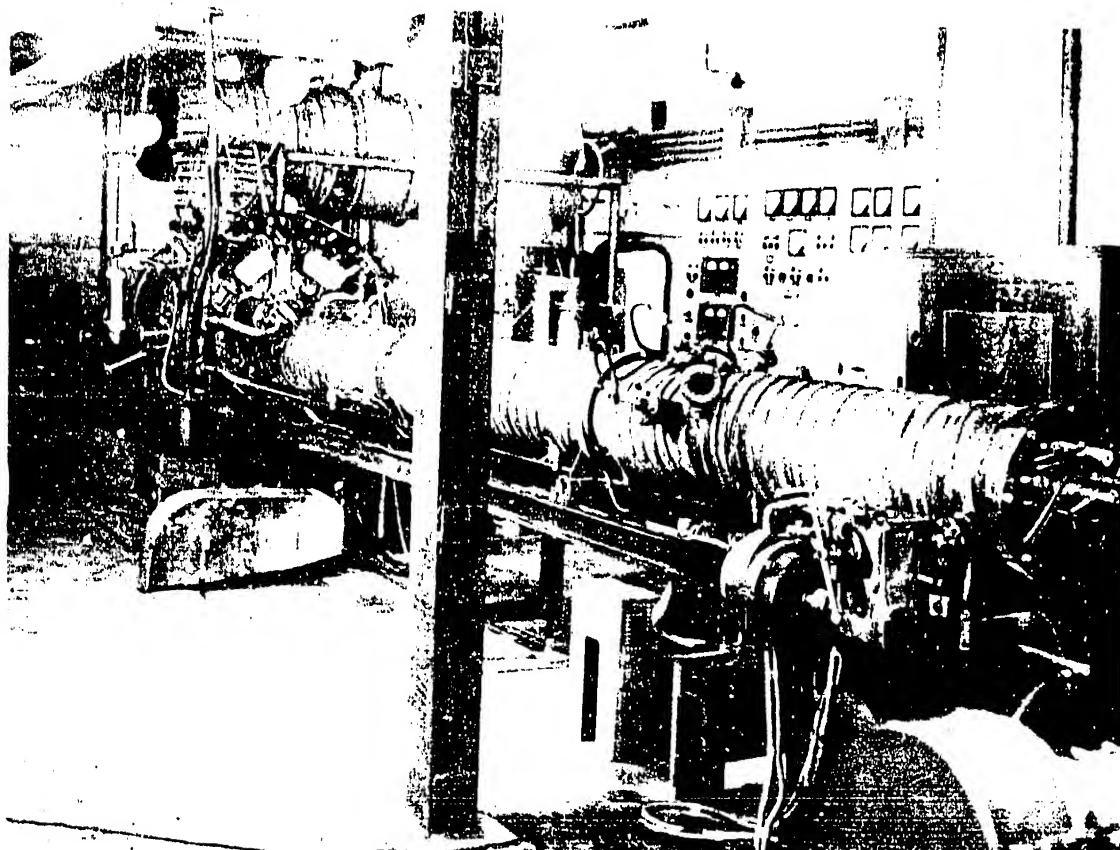


Рис.5. Внешний вид установки для нанесения покрытий на прутки дистилля тонным методом.

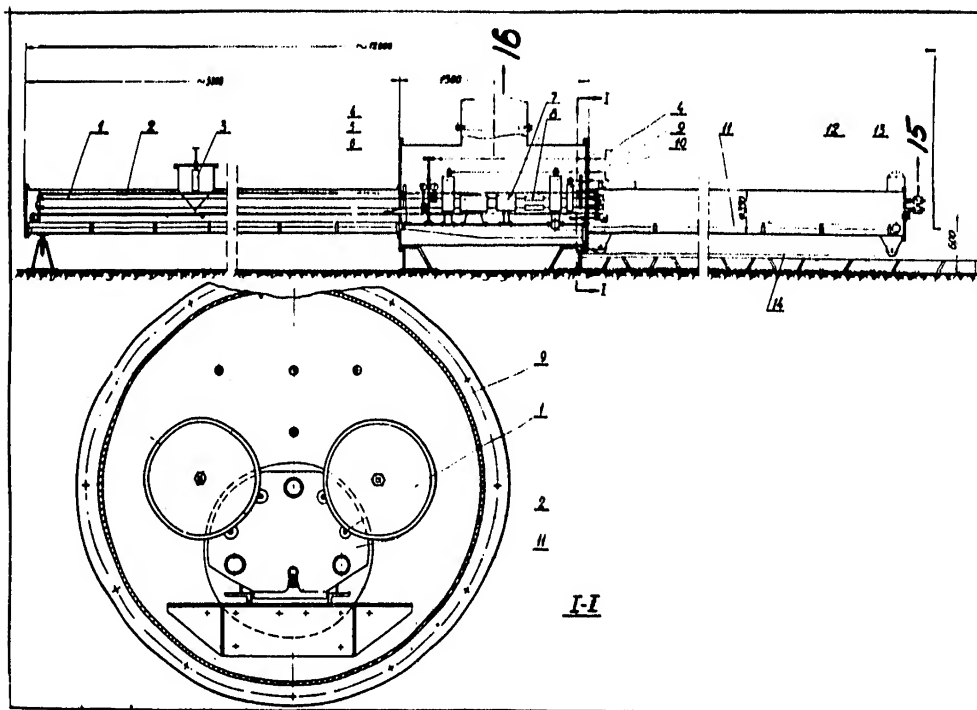


Рис. 6. Схема установки для нанесения покрытий на прутки дистилляционным методом. /1/ - покрываемый пруток, /2/ - каретка, /3/ - электроввод, /4/ - уплотнитель, /5/ - система охлаждения прутков, /6/ - индикатор толщины покрытия, /7/ - печь бериллиевая, /8/ - печь магниевая, /9/ - система зачистки прутков, /10/ - электроввод, /11/ - рельсы для каретки, /12/ - привод каретки, /13/ - камера перезарядки, /14/ - подставка, /15/ - к форвакуумному насосу, /16/ - к диффузионному насосу.

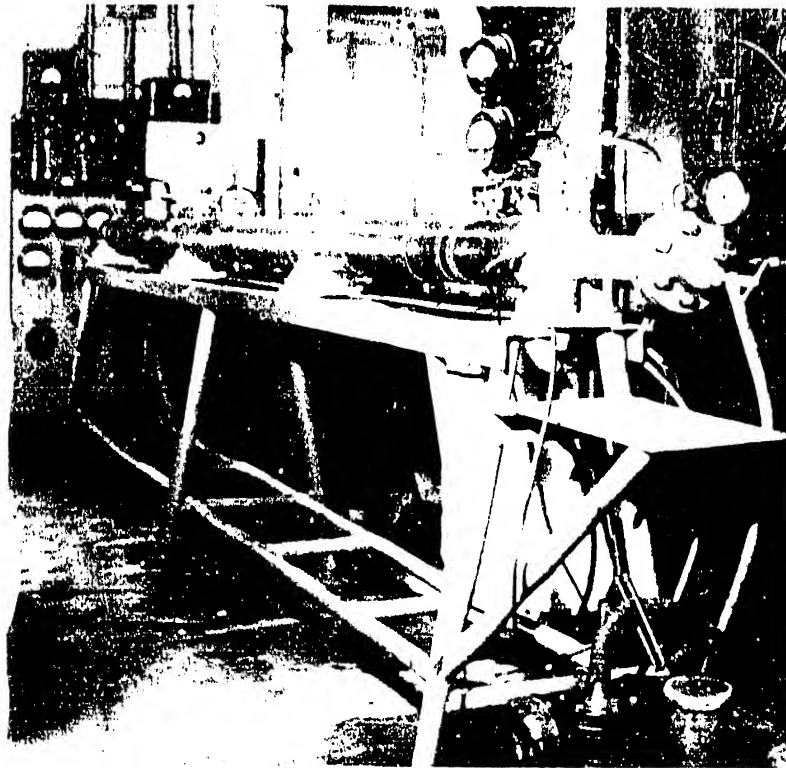


Рис.7. Автоклав для испытания прутков тепло-
водящего элемента на герметичность пос-
ле покрытия.

2983-102



Рис.8. Стенд для продувки тепловыделяющих элементов. 1 - газодувка, 2 - труба для испытываемого тепловыделяющего элемента 3 - теплообменник.



Ис. 9. Пруток тепловыделяющего элемента после доведения его температуры в углекислоте до $700-710^{\circ}$.



Рис. 10. Пруток тепловыделяющего элемента после 23-х часовой выдержки его в углекислоте при температуре $700-710^{\circ}$.



Рис. 11. Пруток тепловыделяющего элемента после 25-минутной выдержки в углекислоте при температуре 750° .



Рис. 12. Продольный разрез по вздутым прутку, испытанного в углекислоте при температурах $520-825^{\circ}$.

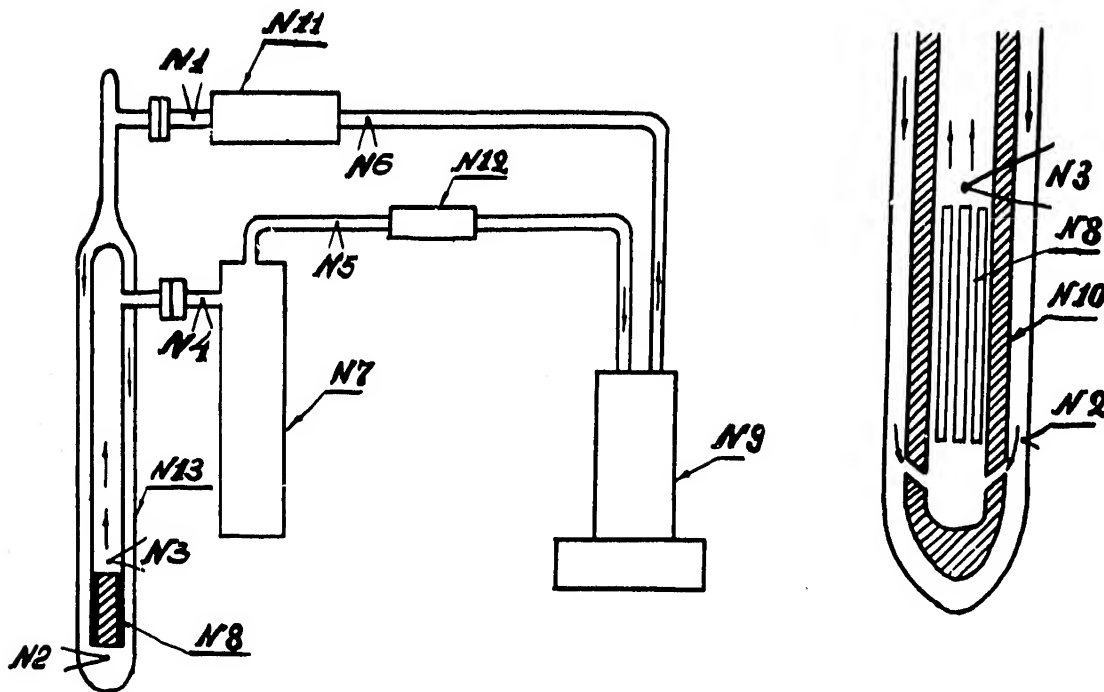


Рис. 13. Схема газовой петли для радиационных испытаний тепловыделяющих элементов. /1/ - замер температуры газа после печи, /2/ - замер температуры газа на входе в тепловыделяющий элемент, /3/ - замер температуры газа на выходе из тепловыделяющего элемента, /4/ - замер температуры газа перед теплообменником, /5/ - замер температуры газа после теплообменника, /6/ - замер температуры газа перед электропечью, /7/ - теплообменник, /8/ - испытуемый элемент /9/ - циркуляционный насос, /10/ - графит, /11/ - электропечь, /12/ - фильтр, /13/ - канал.

Рис. 14. Модель прутка тепловыделяющего элемента подвергавшаяся испытаниям. $/1/$ - стержень; $/2/$ - стержень электросварочный шов; $/3/$ - покрытие; $/4/$ - наконечник.

2083-102

2983-102

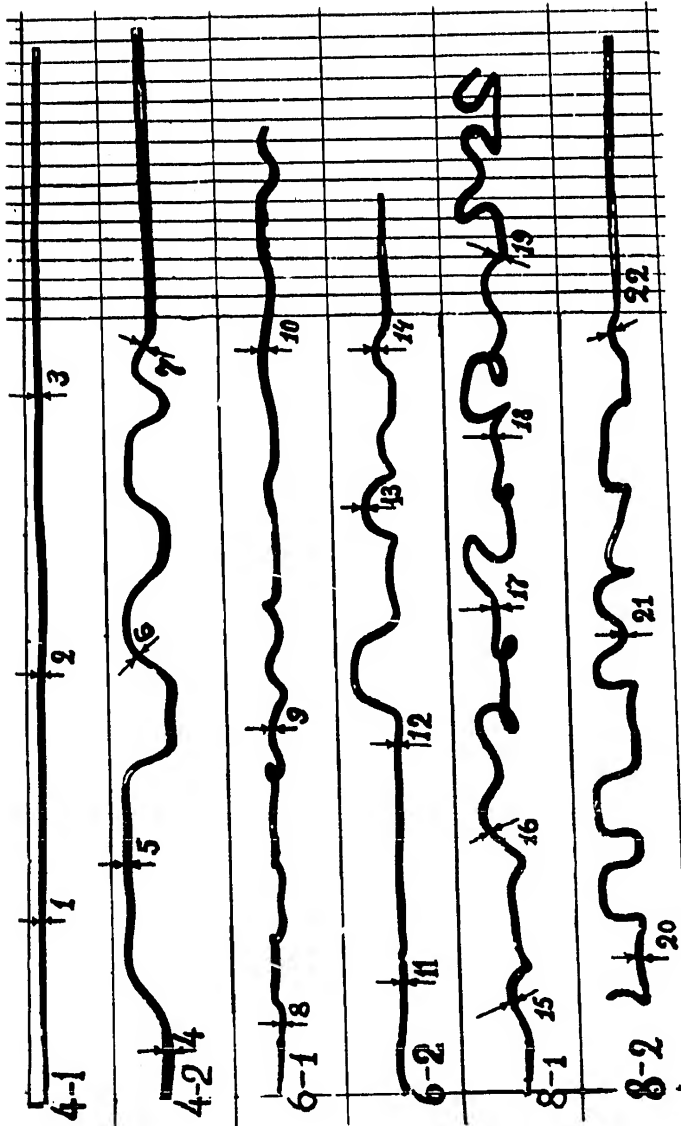


Рис.15. Внешний вид термически не обработанных прутков после испытаний в реакторе.

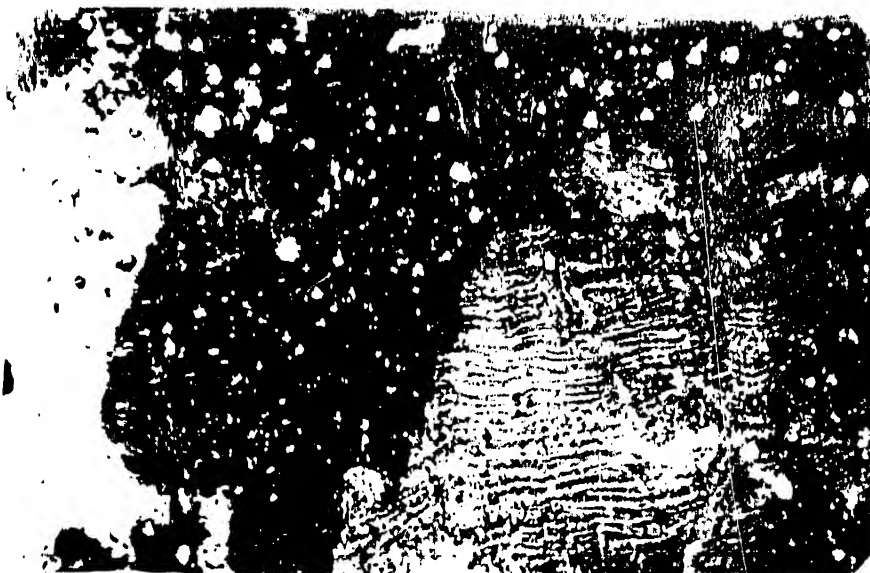


Рис. 16. Микроструктура образца, удлинившегося на 15%. Видно большое количество двойников изогнутой формы. Размер зерен 50-80 микрон. Поляризованный свет /увеличено в 360 раз/.

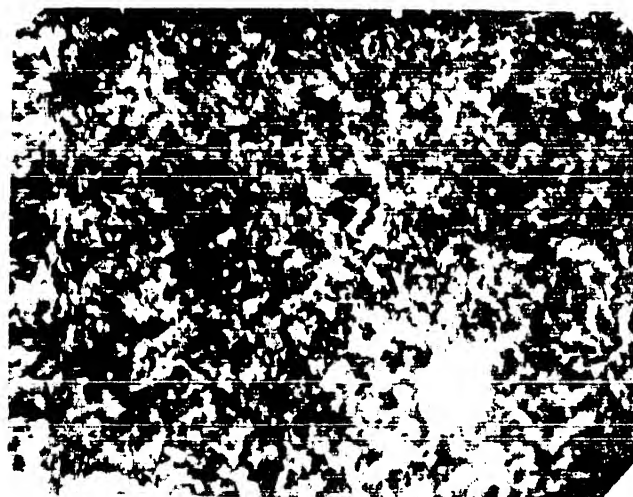


Рис. 17. Микроструктура образца, удлинившегося на 180%. Двойники отсутствуют. Размер зерен 3-5 микрон. Поляризованный свет /увеличено в 360 раз/.

2983-102

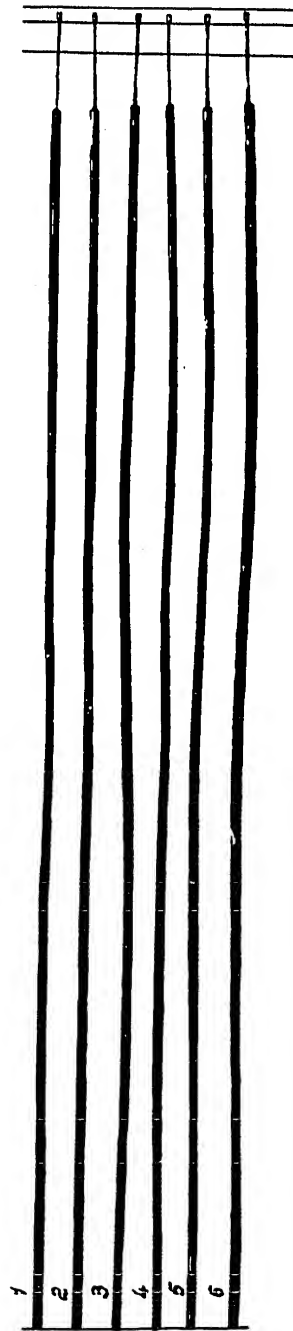


Рис. 18. Общий вид предварительно термообработанных прутков после испытания в реакторе в течение 3000 часов. Выгорание 2,8 кг на тонну.